

# 熱誘電直接発電に関する研究 (その VI)

## 熱誘電静電変圧器の変圧特性について

藤 本 三 治<sup>\*</sup>・松 本 忠<sup>\*\*</sup>

### Some Considerations on the Characteristics of Thermodielectric Transformer.

Sanji FUJIMOTO, Tadashi MATSUMOTO

(Received 18 Oct, 1967)

The principle of thermodielectric transformer is based upon the property that the permittivity of ferroelectrics decreases rapidly as the temperature of element above the Curie temperature  $T_C$  is raised. When  $n$  fundamental transformer circuits are connected in cascade, we call it one row -  $n$  columns type and when the  $m$  blocks of this type are connected in parallel with the input voltage source and in series with the load resistance, we call it  $m$  rows -  $n$  columns type.

This transformer has the following problems. (1) The decrease of voltage gain due to the voltage dependence of element is large. (2) As the terminal voltage of element attains its maximum value at the highest operation temperature  $T_2$ , the insulation break-down voltage is lowered. (3) To increase the total voltage gain of  $m$  rows -  $n$  columns type, the distribution ratio of electrostatic capacitance  $\gamma_k$  must be chosen to be small. (4) The distribution of temperature of element must be uniform.

In this paper, how to improve the transformer characteristics with the above problems is discussed from the viewpoint of the construction of thermodielectric elements and the choice of operation temperatures,  $T_1$  and  $T_2$ .

In chapter 2, the method of calculation and the universal curve for resultant capacitance are shown for the various connections of elements which are nonlinear to temperature and voltage. This universal curve is useful for the calculation of the total voltage gain of one row -  $n$  columns and  $m$  rows -  $n$  columns types.

In chapter 3, the methods of calculating the total voltage gain when the voltage dependence of element is considered are given for each construction of elements.

In chapter 4, the calculated characteristics of this transformer are shown in detail together with the experimental values.

As the results of considerations in this paper, we have arrived at the conclusions given hereunder. (1) When the transformer is constructed mainly with the series connection and the parallel and series composite connection, the above problems are solved, and with a simple operation and low cost a high output voltage can be obtained even with the usual ferroelectrics which are not always suitable for the thermodielectric element. (2) In particular, the parallel and series composite construction is as good as the series construction

\* 教授 (大阪大学)    \*\* 講師

as far as the improvement of voltage gain and insulation breakdown voltage is concerned, and it is comparable with the parallel construction as to the increase of output power due to the large capacitance in each stage. Moreover, it is easy to choose  $\gamma_k$  to be small and to get uniform temperature distribution of element, by using a smaller number of sheets of elements. Therefore, this construction is considered best, and we can construct it under the restriction of more design parameters than in others. (3) We must determine the operation temperatures, considering the decrease of voltage gain and the desired value of it. (4) As the experimental values agree well with the calculated values, the transformer can be designed generally by the procedures mentioned in this paper.

## 1 緒 言

筆者らはさきに強誘電体の誘電率が Curie 温度  $T_c$  以上の温度領域で温度の上昇とともに急激に減少する性質を応用した熱誘電静電変圧器の構成原理、変圧操作法および変圧特性に影響を及ぼす主要因子等についての実験的研究を報告した<sup>3),4)</sup>。その結果、変圧特性に影響を与えるものは動作温度のほか、熱誘電素子の電圧依存性、素子の絶縁破壊、静電容量配分比(図式参照)などであることがわかった。そして、これらによる変圧特性の低下の防止として素子の直列接続構成が有効であることに言及した。

本論文では最良の変圧操作法について、種々の素子

構成法および動作温度の選定が変圧特性にいかに関係するかを定量的に論じ、あわせて実験結果を付してこれら内容の検討を行なった。また、これらの結果から素子の誘電率が温度だけによって変化する理想状態の変圧特性に近づけるための具体的方法を示している。

## 2 熱誘電素子の並・直列接続

強誘電体を材料とする熱誘電素子の静電容量は一般にその温度および印加電圧によって非直線的に変化する。したがって、このような特性をもつ素子を任意の温度、電圧のもとで直列、並列および並直列複合接続したときの合成容量を求めることはかなりめんどうな

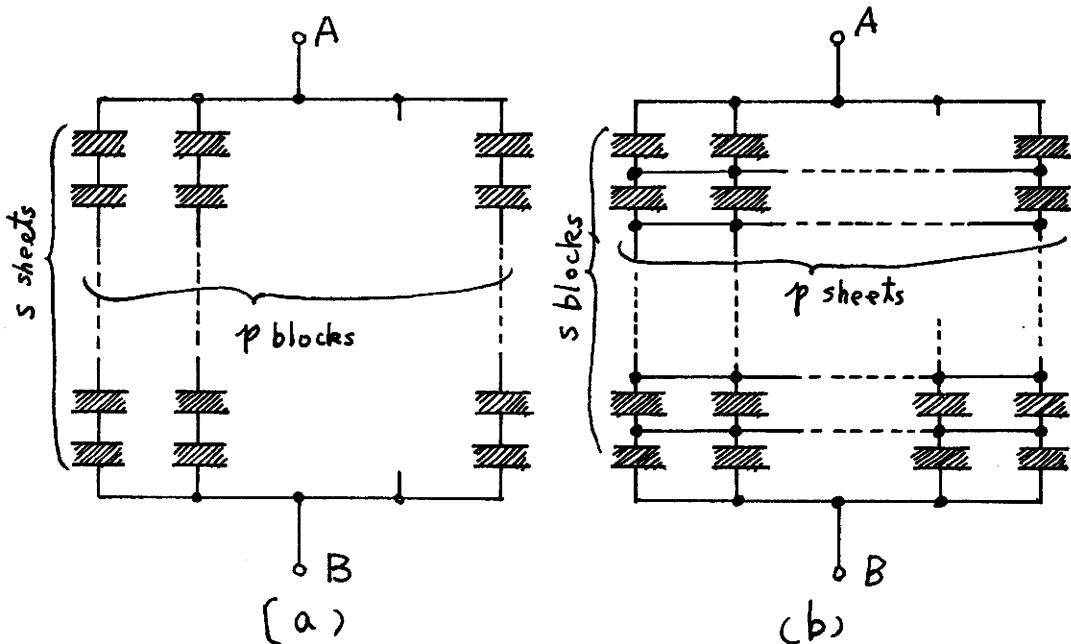


Fig. 1 Composite connections of parallel and series.

手続きを要する。しかし、筆者らがさきに与えた温度および電圧の二価陽関数表示した静電容量の表式<sup>1),2)</sup>を用いれば比較的簡単に合成容量を求めることができる。

電圧  $V$ 、温度  $T (> T_c)$  のもとでの大信号静電容量は

$$C_t(T, V) = \frac{Q}{V} = \frac{C_i(T)}{1 + av + bv^2} \quad \dots\dots(1)$$

$$C_i(T) = \frac{\epsilon_0 C_0^* A}{d(T - \theta)} = \{\alpha(T)\}^{-1} \quad \dots\dots(2)$$

$$v = V/K(T) \quad \dots\dots(3)$$

$$K(T) = \{C_i(T)\}^{-3/2} \{\beta(T_r) - 4\beta\Delta T\}^{-1/2} \quad \dots\dots(4)$$

$$4\beta = -d\beta(T)/dT \geq 0 \quad \dots\dots(5)$$

$$\Delta T = T - T_r \quad \dots\dots(6)$$

である。ここで、 $a = 0.46519$ 、 $b = -0.00646$  は温度および電圧に無関係な定数であり、 $A(m^2)$ ：電極面積、 $d(m)$ ：素子の厚さ、 $\epsilon_0(F/m)$ ：自由空間の誘電率、 $\theta(^{\circ}K)$ ：素子の特性温度、 $C_0^*(^{\circ}K)$ ：Curie 定数、 $T_r(^{\circ}K)$ ：基準温度、 $Q(C)$ ：電荷である。 $\beta(T)$  は素子の小信号静電容量が  $C_i(T)$  の  $1/2$  になるに要する bias 電圧  $V_{s1/2}$  を用いて次式から求められる。

$$\beta(T) = \frac{16}{27C_i(T)^3 V_{s1/2}^2} \quad \dots\dots(7)$$

以下本章では後の説明の都合から、素子を直列、並列および並直列複合接続したときの合成大信号静電容量を与える万能線図を示そう。

## 2・1 並直列複合接続による合成容量

素子の印加電圧および温度に対して(1)式で表わされる特性をもった素子を Fig. 1 のように  $p$  枚並列接続したものを  $s$  block 直列に、または、 $s$  枚直列にしたものを  $p$  block 並列に接続したものの合成容量は(1)式から

$$C_{ut}(T, V) = \frac{p C_i(T)/s}{1 + a(v/s) + b(v/s)^2} \quad \dots\dots(8)$$

となる。ただし、素子の温度はすべて一様に  $T(^{\circ}K)$  で、Fig. 1 の端子 AB 間の印加電圧を  $V(V)$  とする。

いま、 $p = 2$ 、 $s = 2$  のときの  $C_{ut}(T, V)/C_i(T)$  対  $v$  特性を Fig. 2 に一点鎖線で示す。なお Fig. 1 の(a)と(b)を比較すれば、その合成容量は同じであるが、特に(b)は太陽電池の構成<sup>3)</sup>と同様に並列結線が施されているため、たとえその内の一枚が開放破壊しても、その他の素子が有効に動作できる特徴がある。

## 2・2 直列接続による合成容量

(1)式で表わされる特性をもった素子を  $s$  枚直列接続したものの合成容量は(8)式で  $p = 1$  としたものである。このときの  $C_{ut}$

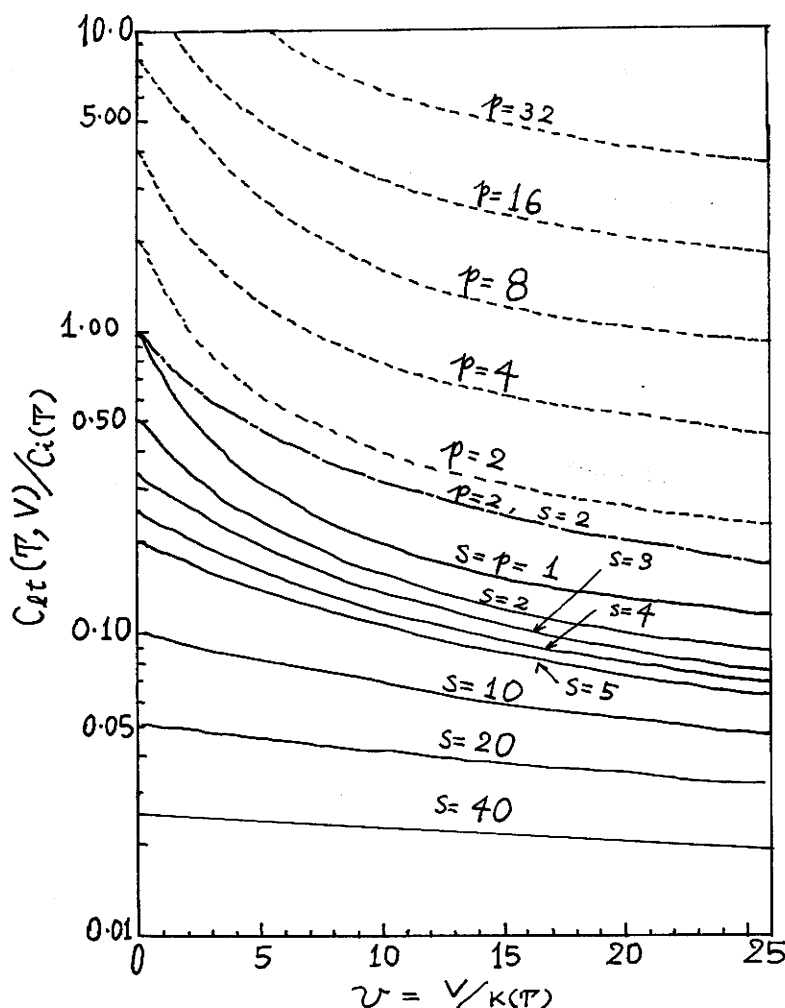


Fig. 2  $C_{ut}(T, V)/C_i(T)$  V. S.  $v$  curves for the various connections of elements,  $s$  and  $p$  are the numbers of sheets of elements connected in series and parallel, respectively.

$(T, V)/C_i(T)$  対  $v$  特性を  $s$  を parameter として図示すれば Fig. 2 の実線のごとくである。

### 2・3 並列接続による合成容量

このときの合成容量は(8)式で  $s = 1$  としたもので与えられる。このときの  $C_u(T, V)/C_i(T)$  対  $v$  特性は Fig. 2 の点線のごとくである。

Fig. 2 の万能線図は素子の  $V$  と  $Q$  の関係が  $V = \alpha(T)Q + \beta(T)Q^3$  と表現されるものに対し共通に用いることができる\*。すなわち、ある温度および電圧に対する合成容量やその電圧依存性を知りたいときは(2)および(4)式から  $C_i(T)$  および  $K(T)$  を計算し、縦軸を  $C_i(T)$  倍、横軸を  $K(T)$  倍すればよい。

また、素子の厚さ  $d$  だけが異なる素子の電圧依存性を考えれば、(1)式で  $d$  に関係する量は  $C_i(T)$  と  $K(T)$  であり、(2)および(4)式から  $C_i(T) \propto d^{-1}$ 、 $K(T) \propto d$  である。それゆえ、素子の厚さを増すことは前述の  $s$  を増すことに等価であり、Fig. 2 (または(8)式)の  $s$  を  $d/d_0$  におきかえればそのまま Fig. 2 は万能線図として使える。(ただし、 $d_0$  は基準の厚さである)同様に素子の極板面積  $A$  だけを増した場合は Fig. 2 (または(8)式)の  $p$  を  $A/A_0$  にかえればよい。 $(A_0$  は基準極板面積である)

### 3 熱誘電静電変圧器の構成と特性計算法

熱誘電静電変圧器の基本回路は Fig. 3 であり、その操作の概要は次のようである。Curie 温度よりわずかに高い温度  $T_1$  に保たれている素子  $C$  を  $S_1$  だけ閉じて入力電圧源  $V_1$  で充電したのち  $S_1$  を開放する。次に  $C$  を加熱して温度を高め  $T_2$  にする。その後  $S_2$  を閉じて負荷抵抗  $R_L$  を負荷する。以後このような cycle を繰返す。

本変圧器の特徴は後述の  $m$  行  $n$  列とともに入・出力間に energy 利得があり、高圧発生が容易なことであるが、実際上次のような諸点に注意しなければならない。

- (i) 素子の電圧依存性による変圧比の低下
- (ii) 素子の沿面放電および絶縁破壊
- (iii) 素子温度の均一性
- (iv) 静電容量配分比を小さく選定すること

これらのうち(i)～(iii)に対しては素子自体の特性を

改善することも重要であるが、実際上は非常に困難である。しかし、第2章でのべたように素子の合成特性を応用すればかなり上述の問題点は緩和できる。本章ではこれらの諸点を定量的に論ずるための関係式をまとめることにする。

#### 3・1 基本回路の変圧比

Fig. 3 の基本回路の  $C$  として(1)式で与えられる特性の素子一枚を用い、上述の変圧操作を行なったときの変圧比  $g_V$  は

$$g_V = \frac{V_2}{V_1} = \frac{2K(T_2)}{F + \sqrt{F^2 - 4bV_1^2}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$F = \frac{K(T_2)}{g} \left\{ 1 + a \frac{V_1}{K(T_1)} + b \frac{V_1^2}{K(T_1)^2} \right\} - aV_1 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$g = \frac{C_i(T_1)}{C_i(T_2)} = \frac{T_2 - \theta}{T_1 - \theta} \quad (\text{理想変圧比}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

と与えられる<sup>1), 3), 4)</sup>。ここで、 $V_1$ 、 $V_2$  は入、出力電圧であり、 $T_2 > T_1 \geq \theta$  である。したがって、素子の諸定数と動作条件  $V_1$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  が与えられれば  $V_2$  および  $g_V$  が求まる。

##### 3・1・1 $C$ を直列構成する場合

基本回路の  $C$  として  $s$  枚直列接続したものを考えれば、このときの変圧比を決める関係式は(8)式で  $p = 1$  としたものをを用いて、

$$C_u(T_1, V_1) \times V_1 = C_u(T_2, V_2) \times V_2 \quad \dots\dots\dots(12)$$

(12)式から  $V_2$  を求めたのち両辺を  $V_1$  で割れば

$$g_V = \frac{2K(T_2)}{F_s + \sqrt{F_s^2 - 4bV_1^2/s^2}} \quad \dots\dots\dots(13)$$

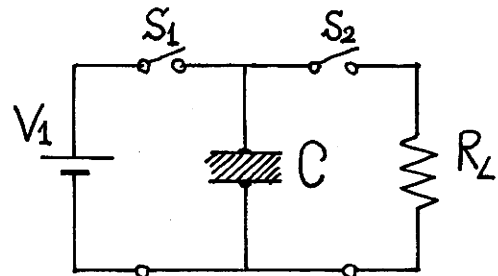


Fig. 3 Fundamental circuit of thermodielectric transformer.

\* (1)式の分母は  $\{1 + 2\cosh(\phi/3)\}/3$  を近似したものである。<sup>1), 3), 4)</sup> (ただし、 $\phi = \cosh^{-1}(1 + 27v^2/2)$ ) したがって、元式は  $v$  の偶関数であるから、本論文にのべる変圧器や強誘電体振幅制限器<sup>3)</sup>のように特性が静電容量値そのもので決まるときは(1)式を用いてもよいが、たとえば、周波数の混合作用などのように  $C_i(T, V)$  の電圧依存性の関数形も問題になるときは(1)式のかわりに改めて近似しなおしたものを用いる必要がある。

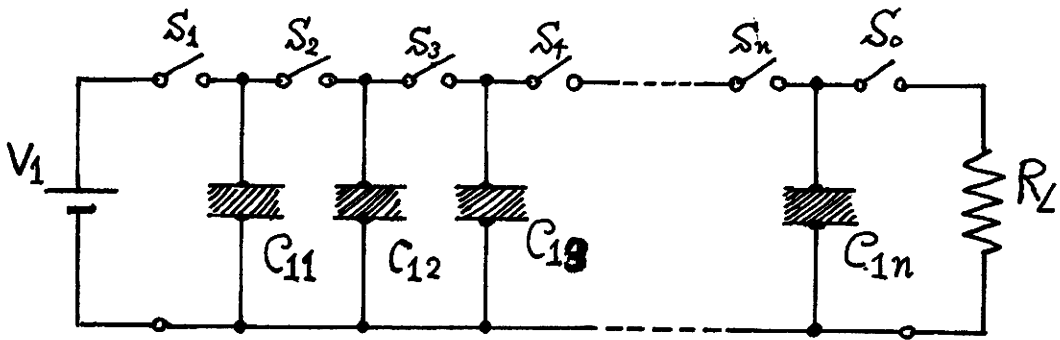


Fig. 4 One row-n columns type

$$F_s = \frac{K(T_2)}{g} \left\{ 1 + a \frac{V_1}{sK(T_1)} + b \frac{V_1^2}{s^2 K(T_1)^2} \right\} - a \frac{V_1}{s} \quad \dots\dots(14)$$

と変圧比は求まる。なお、順次素子の厚さ  $d$  を大きくしたものをを用いるときの変圧比は(13)式で  $s = d/d_0$  とすればよい。

### 3・1・2 C を並列構成する場合

このときの変圧比は(8)式で  $s = 1$  としたものをを用いて  $C_i(T_1, V_1) \times V_1 = C_i(T_2, V_2) \times V_2$  から決まる。したがって、変圧比は(9)式に一致する。

### 3・1・3 C を並・直列複合構成する場合

Fig. 1 の場合であるが、このときの変圧比を決定する関係式は(8)式を用いて

$$\frac{C_i(T_1)}{1 + a(V_1/sK(T_1)) + b(V_1/sK(T_1))^2} \times V_1 = \frac{C_i(T_2)}{1 + a(V_2/sK(T_2)) + b(V_2/sK(T_2))^2} \times V_2 \quad \dots\dots(15)$$

となる。したがって、変圧比は(13)式に一致する。

## 3・2 1 行 $n$ 列形の変圧比

1 行  $n$  列形は Fig. 4 のように基本回路を  $n$  段縦続接続したものである。この変圧操作法は種々考えられるが、そのうち最高の変圧比を与える操作法は次のごとくである。すなわち、まず、switch  $S_1 \sim S_n$  を閉じ最低動作温度  $T_1$  にある素子群  $C_{11} \sim C_{1n}$  のすべてを  $V_1$  で充電する。次にすべての switch を開き  $C_{11}$  だけを加熱して最高温度  $T_2$  になったとき switch  $S_2 \sim S_n$  を閉じて後段の素子群  $C_{12} \sim C_{1n}$  へ電荷を送っていく。以後  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ , ……などについても順次同様の操作を繰返せば、全体としての変圧比  $G_I$  は

$$G_I = \frac{V_2}{V_1} = \prod_{k=1}^n m_{1k} \quad \dots\dots(16)$$

$$m_{1k} = 1 + (g_k - 1) / \left\{ 1 + g_k \sum_{l=k+1}^n C_{1l}/C_{1k} \right\} \quad \dots\dots(17)$$

で与えられる<sup>3), 4)</sup>。ただし、(16)式では素子の電圧依存性は考慮されておらず、 $g_k$  は第  $k$  段目の理想変圧比であって(2)式から

$$g_k = C_{ik}(T_1)/C_{ik}(T_2) \quad \dots\dots(18)$$

である。また、

$$\sum_{l=k+1}^n C_{1l}/C_{1k}$$

を変形すれば

$$\sum_{l=k+1}^n C_{1l}/C_{1k} = r_k \times (1 + r_{k+1} + r_{k+1}r_{k+2} + \dots + r_{k+1}r_{k+2} \dots r_{n-1}) \quad \dots\dots(19)$$

$$r_k = C_{1(k+1)}(T_1)/C_{1k}(T_1) \quad \dots\dots(20)$$

となり、 $r_k$  を  $k$  段目の静電容量配分比と呼ぶ。(ただし、 $k = 1, 2, \dots, n$ ) (16), (17)および(19)式からわかるように  $G_I$  を大きくするためには  $r_k < 1$ , すなわち、後段になるほど静電容量が小さくなるように構成しなければならない。

以下 1 行  $n$  列形の  $C_{1k}$  を第 2 章のように構成したときの変圧比を考えることにしよう。その際、議論を簡単にするため各段素子に与える温度変化は一様であり素子の特性も同じであるとする。

### 3・2・1 $C_{1k}$ を直列構成する場合

前述の操作法にしたがって 1 行  $n$  列形を動作させるとき、各段素子に逐次熱照射をしてゆけば素子の端子電圧も順次増大する。

その結果、静電容量の値はその未知端子電圧によっても変化しているため、1 行  $n$  列形の電圧依存性を考

慮に入れた変圧比を与える一般式を求めることは困難である。そこで、本節では理想状態の変圧比0式を用いて逐次数値計算して求める手順を明らかにしておこう。なお、上述のことからも明かなように、素子の端子電圧が変化することにより(20)式の静電容量配分比 $r_k$ も変化する。いま、第 $k$ 段目を $s_1$ 枚、第 $(k+1)$ 段目を $s_2(>s_1)$ 枚直列接続したとすれば、(8)式で $p=1$ としたものおよび(20)式から

$$r_k = r_0 \left\{ \frac{1 + a(v/s_1) + b(v/s_1)^2}{1 + a(v/s_2) + b(v/s_2)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$r_0 = \frac{s_1}{s_2} < 1 \quad \dots\dots\dots(22)$$

となり、 $r_0$ は電圧依存性がないときの静電容量配分比である。 $s_1$ 、 $s_2$ に種々の値を与えたときの $r_k$ の $v$ による変化を $r_0$ で規格化して図示すれば Fig. 5 の実線

( $r_0=0.333$ )および点線( $r_0=0.50$ )のごとくである。

さて、素子の諸定数、動作温度および $r_0$ が与えられている場合の電圧依存性を考慮に入れた変圧比を求める手順は次のようである。

(i) (4)および(11)式から $K(T_1)$ 、 $K(T_2)$ および $g$ を求める。

(ii) Fig. 2 万能線図の直列接続枚数 $s$ に対応する実線で示された曲線から $V_1 = vK(T_1)$ に対する $C_{11}(T_1, V_1)/C_{11}(T_1)$ を読みとる。

(iii) (ii)の結果を用いて(19)式から

$$\sum_{l=2}^n C_{1l}/C_{11}$$

を求める。

(iv) (13)式から各段の $s$ に対する $g_v - V_1$ 特性を計

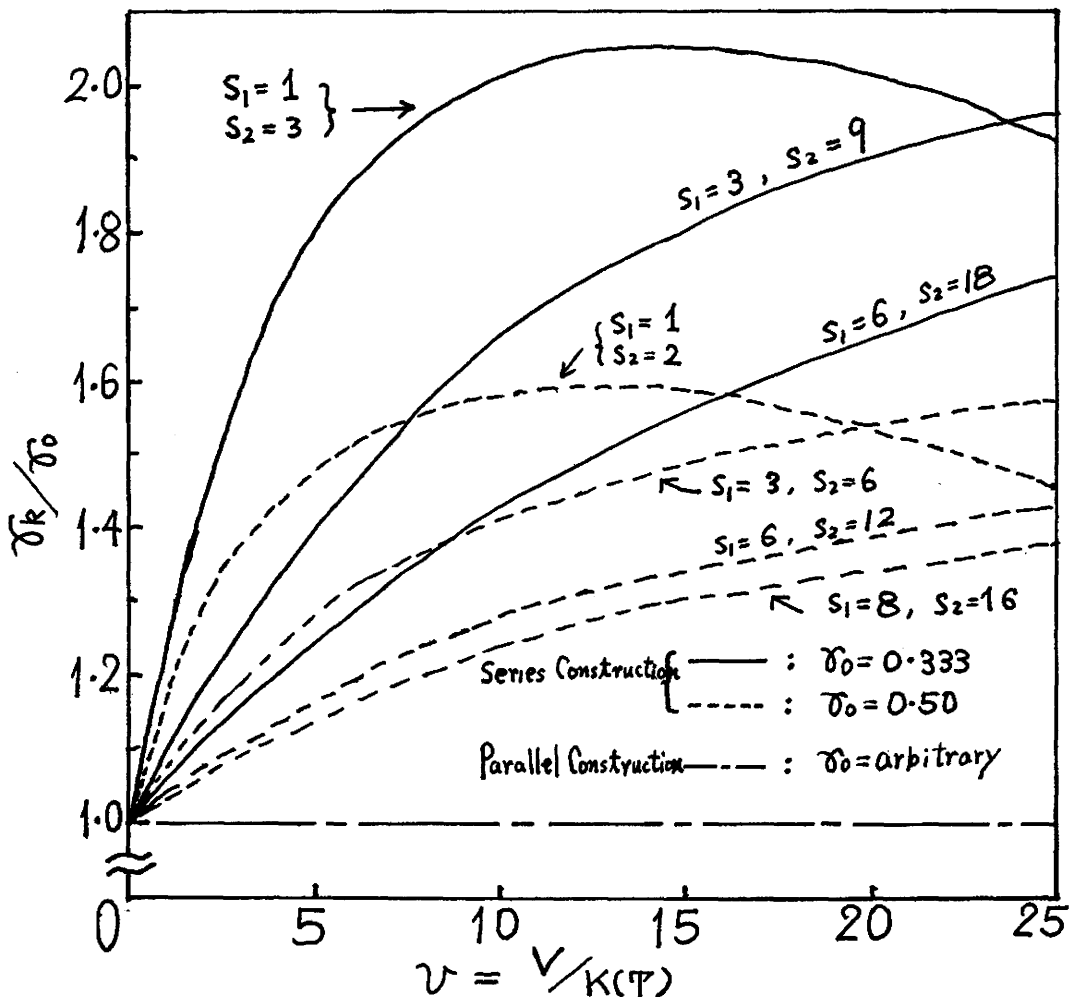


Fig. 5 Normalized distribution ratio of electrostatic capacitance as a function of  $v$

算しておき、まず、第1段目の  $V_1$  に対する変圧比を読みとる。

(V) (iii)および(iv)の結果を(7)式に代入して  $m_{11}$  を求めれば、そのときの発生電圧は  $m_{11} V_1$  となる。

(vi) 以後第2段目以下の入力電圧として  $m_{11} V_1$  を考え、上記の手順を繰返して  $m_{12}$  を求める。さらに第3段目以下の入力電圧として  $m_{11} m_{12} V_1$  を考え、以下同様にして  $m_{1n}$  まで求める。

(vii) 以上の結果を(8)式に代入すれば  $G_I$  および  $V_2$  が求まる。

### 3・2・2 $C_{1k}$ を並列構成する場合

まず、このときの静電容量配分比  $r_k$  を考えよう。いま、第  $k$  段目を  $p_1$  枚、第  $(k+1)$  段目を  $p_2 (< p_1)$  枚並列接続したとすれば、(8)式で  $s=1$  としたものとおよび(20)式から

$$r_k = r_0 = p_2 / p_1 < 1 \quad \dots\dots\dots(23)$$

となつて、 $r_k$  は電圧によって変化しないことになる。したがって、並列構成では任意の  $r_0$  に対して Fig. 5 の一点鎖線のごとくなる。それゆえ、(17)式で電圧によって変化する量は各段の変圧比  $g_k$  だけとなる。この  $g_k$  の電圧依存性は (9) 式で与えられ、単独一枚の素子を用いた基本回路の特性に等しい。

素子の諸定数、動作温度、 $r_k = r_0$  が与えられれば、次の手順で電圧依存性を考慮した変圧比が求まる。

(i)  $K(T_1)$ ,  $K(T_2)$  および  $g$  を(4)および(11)式から求める。

(ii) (9)式を用いて  $g_0 - V_1$  特性を計算する。

(iii) (19)式で  $k=1 \dots\dots\dots n$  について求めておく。

(iv) 以上の準備で (3・2・1) と同様に  $C_{11}$  から始めて  $C_{1n}$  までの  $m_{1k}$  を求めれば全変圧比が得られる。

### 3・2・3 $C_{1k}$ を並・直列複合構成する場合

いま、第  $k$  段目は Fig. 1 のように  $p_1$  枚並列  $s_1$  枚直列、第  $(k+1)$  段目は  $p_2 (< p_1)$  枚並列、 $s_2 (> s_1)$  枚直列の複合構成であるとすれば、このときの静電容量配分比は(8)および(20)式から明らかなように(24)式で  $r_0$  を

$$r_0 = \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \left( \frac{s_1}{s_2} \right) < 1 \quad \dots\dots\dots(24)$$

としたものとなる。したがって、 $r_k$  の電圧依存性は直列接続枚数  $s_1$ ,  $s_2$  によって決まるから直列構成と同じであるが、 $r_0$  は(24)式のように与えられるため、素子の全使用枚数を少なくして  $r_0$  を小さく、かつ、種々の値に選ぶことが容易となる。たとえば、 $p_1=9$ ,  $s_1=3$ ,  $p_2=3$ ,  $s_2=15$  とすれば  $r_0=0.06$  となり、 $r_k$  の電圧依

性は  $s_1$  と  $s_2$  によって決まり Fig. 5 のように変化する。

それゆえ、変圧比を求める手順は Fig. 2 の一点鎖線を用いて合成容量を読みとるほかは (3・2・1) と同じである。

### 3・2・4 以上の3構成を併用する場合

1 行  $n$  列形のすべてを並列構成または直列構成して  $r_0$  を小さく選定すると、素子の全使用枚数が多くなり温度分布を均一にすることは困難である。その結果、静電容量の温度による等価の変化率が低下して変圧比が減少する。このような不都合をなくするには (3・2・3) の構成法は有利であるが、そのほか、多少変圧比の電圧依存性による低下が大きくなっても 1 行  $n$  列形の前半を並列構成、中段を並直列複合構成、後半を直列構成する方法がある。これは全使用素子数も比較的少なく、素子の沿面放電、絶縁破壊の点からも好ましい。

この変圧比を求める手順は (3・2・1) ~ (3・2・3) までの併用となる。

## 4 実験結果および検討<sup>6),7)</sup>

本章では第3章にのべた種々の構成法で実験した結果を計算値と比較しながらのべ、変圧特性におよぼす素子構成法および動作温度の選定の影響について検討する。また、変圧特性を理想状態の変圧特性に近づけるための具体的方法についてふれることにする。

### 4・1 熱誘電素子の特性

使用した熱誘電素子は Table 1 に示した諸定数をもった  $\text{BaTiO}_3$  (89%) +  $\text{CaSnO}_3$  (10%) + その他 (1%) からなる平行平板形磁器 condenser であり、素子の電極は周辺部から 1 ~ 1.5 mm を残して銀 paste を焼付けたものである。また表面には数回 silicon oil を塗布してある。

Table. 1 Constants of thermodielectric element

A ( $m^2$ )	$4.6 \times 10^{-4}$	$C_0$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	$1.165 \times 10^5$
d (m)	$4 \times 10^{-4}$	$\beta(T_r)$ ( $\text{F}^{-1}\text{V}^{-2}$ )	$9.7 \times 10^{15}$
$T_r$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	291.9	$T_r = 317.5^{\circ}\text{K}$	
$\theta$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	291	$\Delta\beta(\text{F}^{-1}\text{V}^{-2}\text{K}^{-1})$	$1.93 \times 10^{18}$
		$C_s(T_c)$ ( $\mu\text{F}$ )	0.12

### 4・2 基本回路の特性

#### 4・2・1 直列構成

Table 1 の素子を  $s$  枚直列接続したものを Fig. 3

の  $C$  としたときの実測特性は Fig. 6 (a) の点線のごとくである。このときの動作温度は  $T_1 = 300.5^\circ K$ ,  $T_2 = 334^\circ K$  である。他方、素子の諸定数および動作条件を (9) 式へ代入して得られた計算特性は Fig. 6 (a)~(c) の実線のごとくであり、一点鎖線は素子の電圧依存性のない理想状態の特性である。

これらの結果、実測値と計算値の対応はかなりよく直列構成の基本回路の特性に与える影響は次のように要約できる。

- (i) 素子の実効的絶縁破壊電圧を高める。
- (ii) 素子の電圧依存性が緩和される結果、 $s$  を大にするほど変圧比は理想値に近づく。(しかし、 $s$  が大なるほどその改善度はゆるくなる。Fig. 6 (c) 参照)
- (iii) 1 行  $n$  列形または  $m$  行  $n$  列形においては、(i) の目的のため後段ほど  $s$  を大にするが、このことは  $r_k$  を小さく選定することにもなる。
- (iv) 素子のすべてに一律な温度変化を与えやすい。

#### 4.2.2 並列構成

このときの変圧比は並列接続枚数  $p$  に無関係に一定であり、その電圧依存性は (9) 式で与えられる。したがって、この並列構成は変圧比の電圧依存性および素子の絶縁破壊などの改善には何ら寄与しないが、次の特徴をもつ。

(i) 1 行  $n$  列形や  $m$  行  $n$  列形において、この並列構成をその他の構成法と併用すれば、全使用素子数を少なくして静電容量配分比  $r_k$  を小さくできる。

(ii) 並列構成すれば静電容量の値は大きくなるから、取り扱う energy は増大し、出力電力も大きくなる。

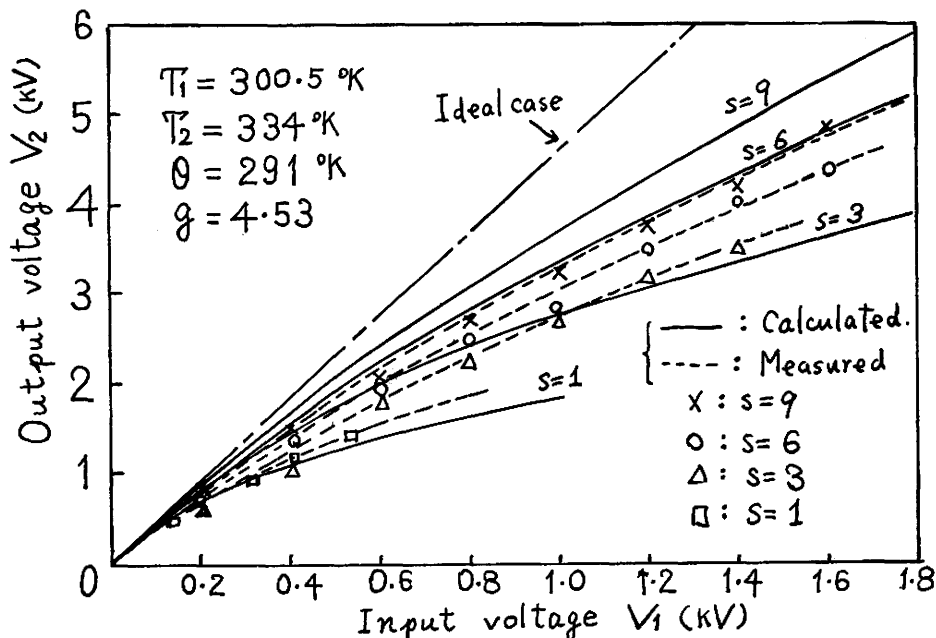
いま、Fig. 6 と同じ動作温度について求めた  $g_0-p$  特性を示せば Fig. 7 のごとくであり、これと Fig. 6 (c) を比較すれば上述のことがらがよく理解されよう。

#### 4.3 1 行 $n$ 列形の特性

##### 4.3.1 並列構成

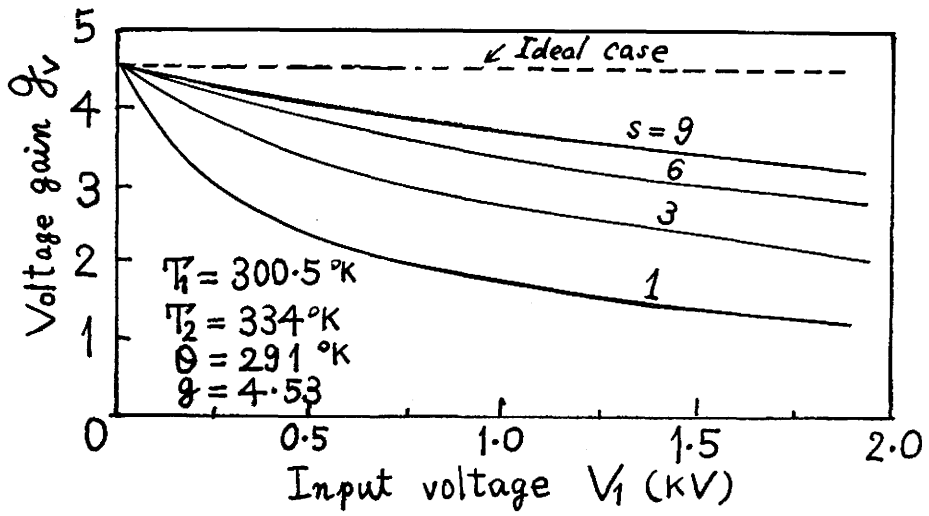
Fig. 8 に示すように各段素子を並列構成し、 $r_k = r_0 = 0.333$  (2 通り) および  $0.5$  (4 通り) となるようにしたときの 1 行 3 列形の  $V_2-V_1$  特性実測値を同図に種々の記号を用いて示す。このときの動作温度は  $T_1 = 303^\circ K$ ,  $T_2 = 330.6^\circ K$  である。Table 1 の諸定数と上記動作条件を用い (3.2.2) にのべた手順で計算した値は同図実線のごとくである。この結果、1 行  $n$  列形においても並列構成する枚数の大小が変圧比 (すなわち、出力電圧  $V_2$ ) の電圧依存性および絶縁破壊の改善に寄与しないのは基本回路におけると同様である。

なお、並列構成においては  $r_k = r_0$  であり、その値は Fig. 5 に示したように電圧に対して変化しなく一定で

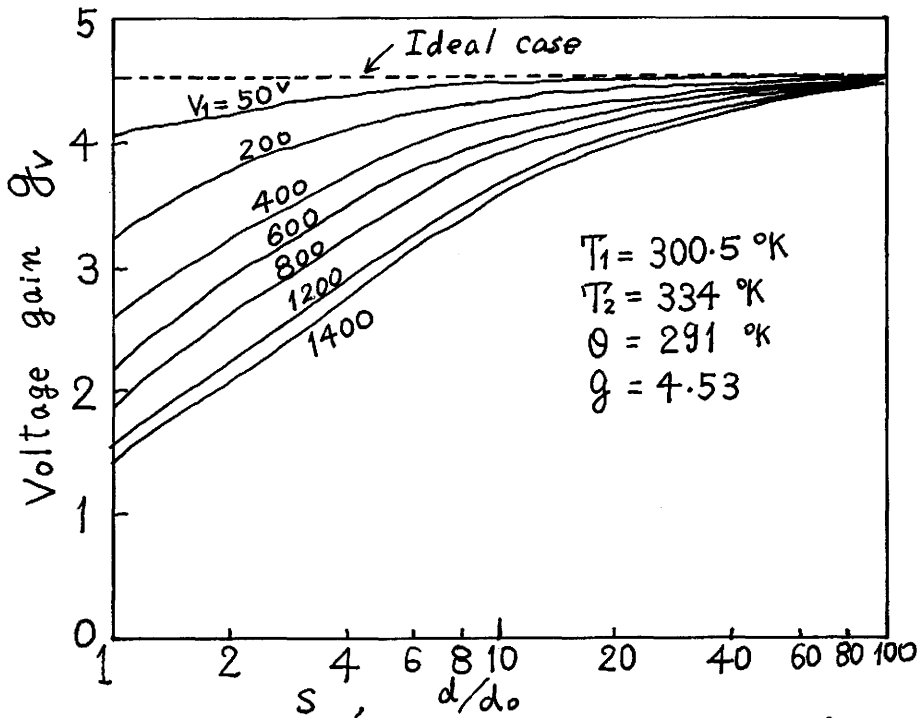


(a)  $V_2 - V_1$  characteristics, ( $s$ : parameters)





(b)  $g_v - V_1$  characteristics. ( $s$ : parameters)



(c)  $g_v - s$  characteristics. ( $V_1$ : parameters)

Fig.6 Influences of the series construction of thermoelectric elements on the characteristics of fundamental circuit.

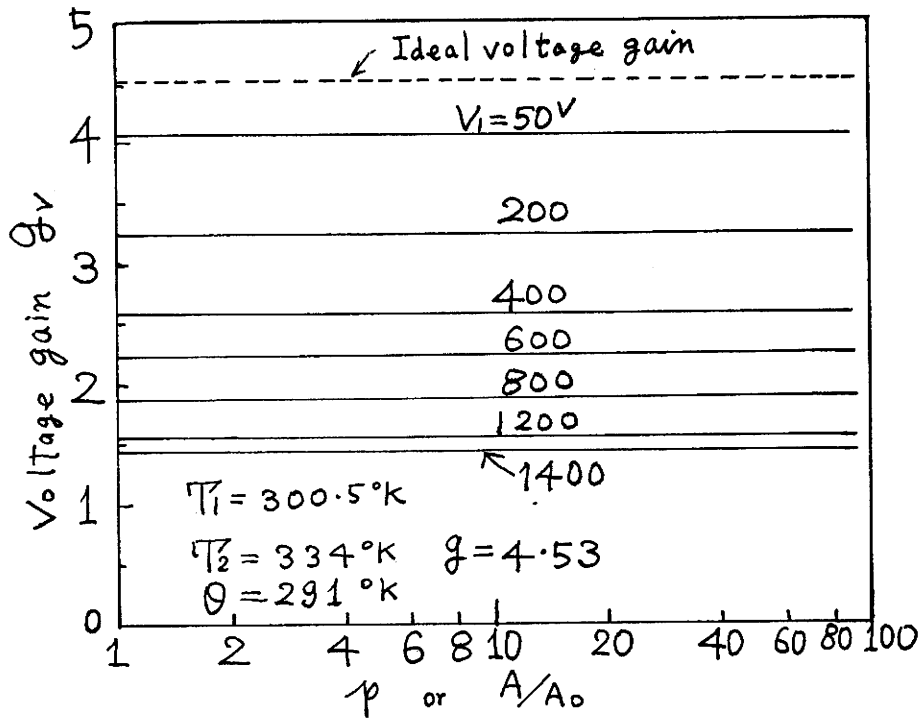


Fig. 7 Influences of the parallel connection on the characteristics of fundamental circuit.

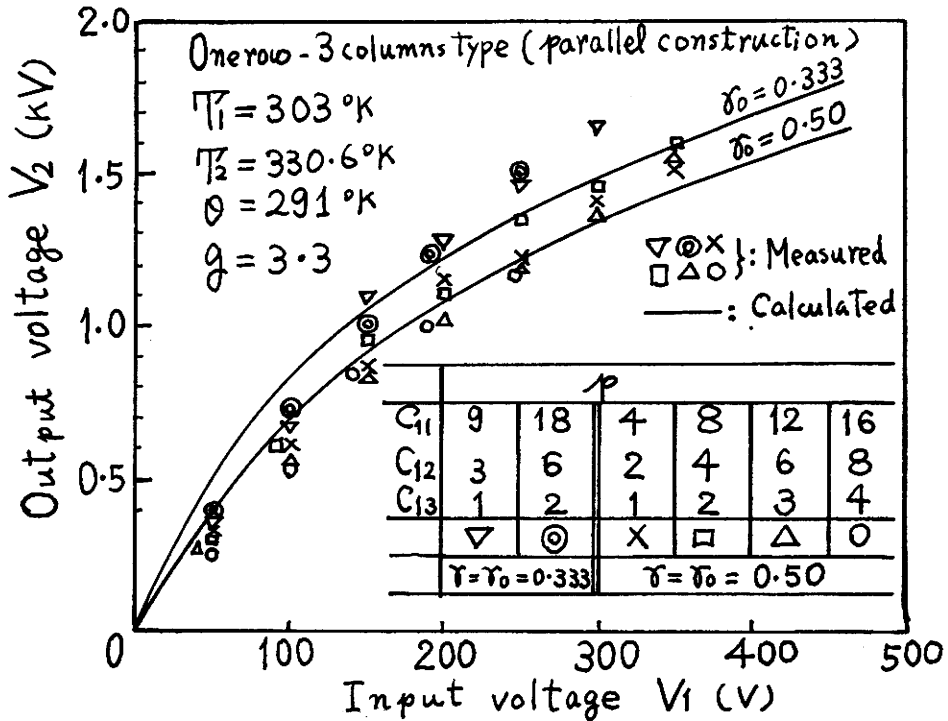


Fig. 8 Characteristics of the one row - 3 columns type. (Each stage is constructed in parallel connection of elements.)

ある。したがって、以前に明らかにしたごとく<sup>(3),(4)</sup>  $r_k = r_0$  を小さく選定するほど出力電圧は大きくなる。Fig. 8 の  $r_k = r_0 = 0.333$  と  $0.5$  の実測値、計算値ともにこのことがらをよく説明していることがわかる。

#### 4・3・2 直列構成

同じく1行3列形において  $r_0 = 0.333$  (2通り) および  $0.5$  (4通り) となるように各段素子を直列構成したときの  $V_2 - V_1$  特性の実測値は Fig. 9 (a) および (b) の点線のごとくである。このときの動作温度は  $T_1 = 304^\circ K$ ,  $T_2 = 341.4^\circ K$  である。これらの条件のもとで (3・2・1) にのべた手順にしたがって求めた計算値はそれぞれ同図の実線のごとくである。

直列構成では、並列構成とはことなり、 $r_0$  = 一定のもとで全使用素子数を2倍、3倍……とすれば、それにつれ出力電圧も増加している。この理由は

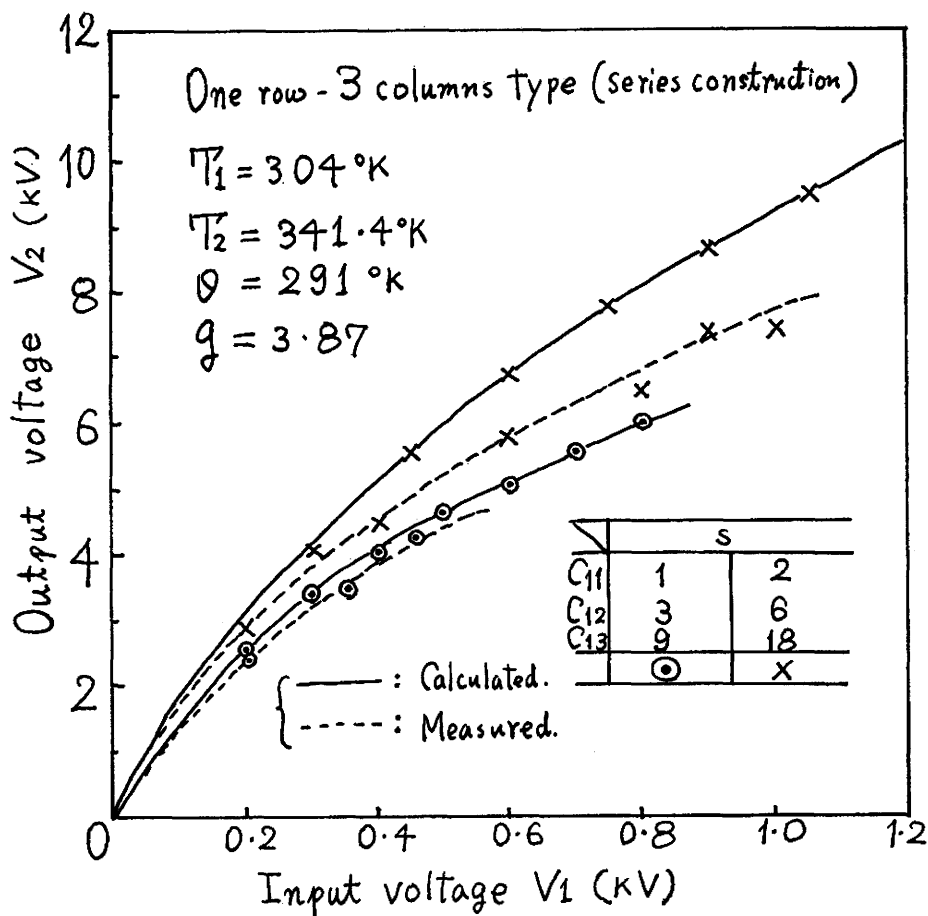
(i) 並列構成の各段変圧比は  $\rho$  に無関係に一定であったのに反し、直列構成の各段変圧比は (13) 式のごとく  $s$  が大なるほど入力電圧による低下が改善される。

(ii) 並列構成の静電容量配分比  $r_k$  は電圧によって変化しなかったのに反し、直列構成の  $r_k$  は Fig. 5 (すなわち図式)のごとく入力電圧の増大につれ大きくなり(しかし、 $s_1$  が小さいとき最大値を有する)、その増加度は同じ  $r_0$  でも素子数が大きいほどゆるやかになる。この2つがそれぞれ (17) 式の  $g_k$  と

$$\sum_{i=k+1}^n C_{i1}/C_{1k}$$

に影響するためである。

また、同図の (a) と (b) の  $C_{11}$  の枚数が同じもの同士を比較すれば、明らかに (a) の出力電圧が大きい。この理由は (a) の  $r_0$  自体が小さいためのほか、2段目、3段



(a)  $r_0 = 0.333$

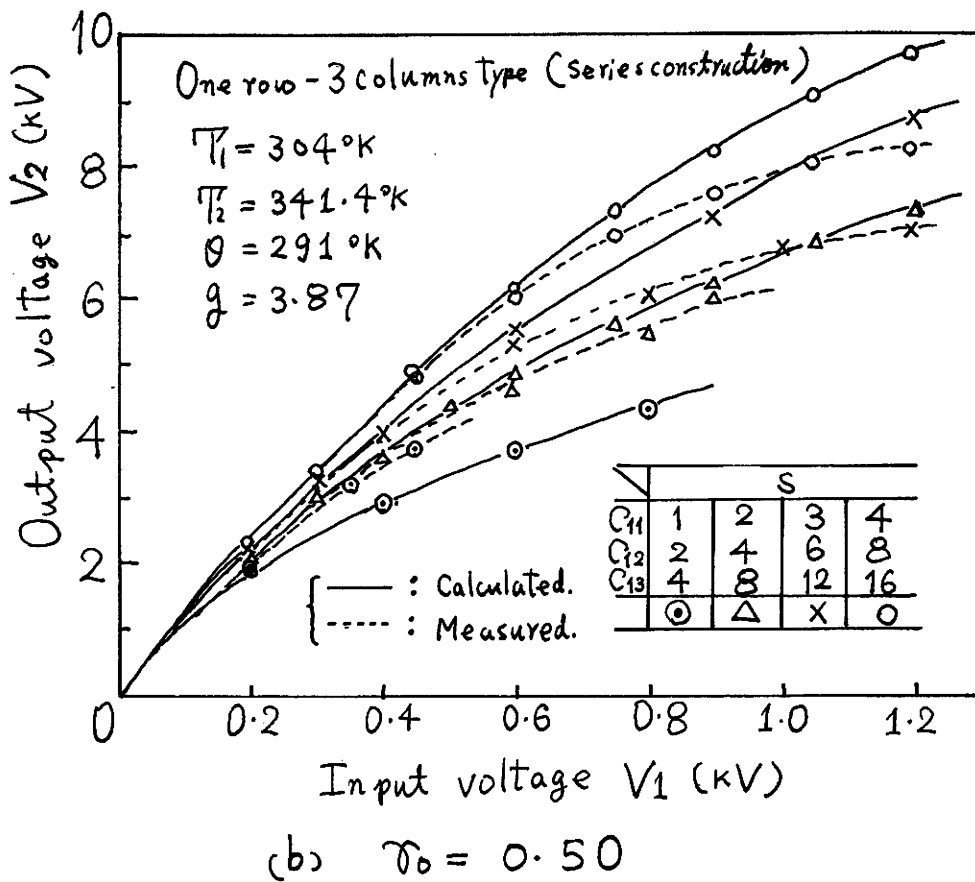


Fig. 9 Characteristics of one row - 3 columns type. (Each stage is constructed in series connection of elements)

目の  $s$  が (b) より大きいことにもよる。

#### 4・3・3 並列，並直列複合および直列構成の併用

(3・2・4) にのべた理由から，1～3段は並列構成，4段目は  $p=2, s=2$  の並直列複合構成，5～7段は直列構成した1行7列形の特性例をFig. 10に示す。このとき  $r_0=0.5$  であり，点線は実測値，実線は計算値である。動作温度は  $T_1=300.3^\circ\text{K}$ ， $T_2=348.5^\circ\text{K}$  であって，この結果も実測値と計算値はほぼ一致している。

#### 4・4 $m$ 行 $n$ 列形の特性

さらに大きい出力電圧を得るために，Anderson 氏のいう静電変圧器の原理を併用したものが  $m$  行  $n$  列形である。<sup>3), 4)</sup> すなわち，Fig. 4 の1行  $n$  列形を  $m$  block 用意し，入力電圧源に対しては並列に，負荷抵抗に対しては直列接続されるようにしたものである。この全変圧比は理想状態で

$$G_T = \sum_{j=1}^m \prod_{k=1}^n m_{jk} \quad \dots\dots\dots (25)$$

である。ここで， $m_{jk}$  は (17) 式の1を  $j$  にかえたものである。特に各 block に与える温度変化が同じであるとすれば (25) 式は次式となる。

$$G_T = m \prod_{k=1}^n m_{1k} \quad \dots\dots\dots (26)$$

したがって，電圧依存性を考慮に入れた変圧比を求める手順は1行  $n$  列形と同様に行なえばよい。

いま，Fig. 11 のように  $r_0=0.5$  となるように構成した3行5列形の特性を各 block (すなわち，○印は1行目の1行5列形，×印は2行目の1行5列形，△印は3行目の1行5列形) の出力電圧とともに同図に示す。このときの動作温度 ( $T_1=298.8^\circ\text{K}$ ， $T_2=340^\circ\text{K}$ ) および Table 1 の定数を (26) 式に代入して求めた計算値は同図実線のごとくである。しかしながら， $m$  行  $n$  列形の新たな問題点は各 block の出力電圧を最終的に負

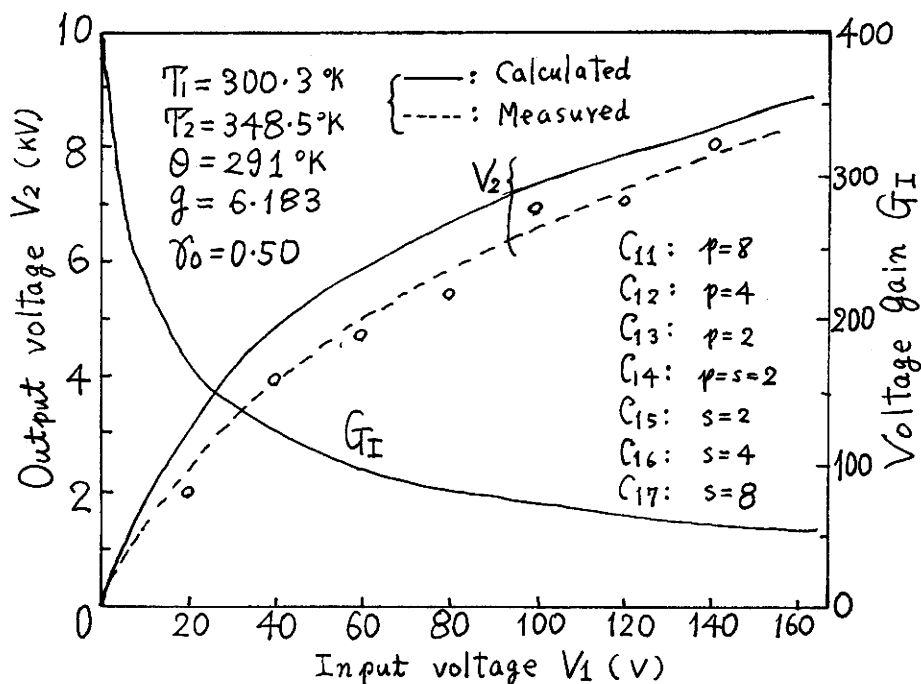


Fig.10 Characteristics of one row-7 columns type.

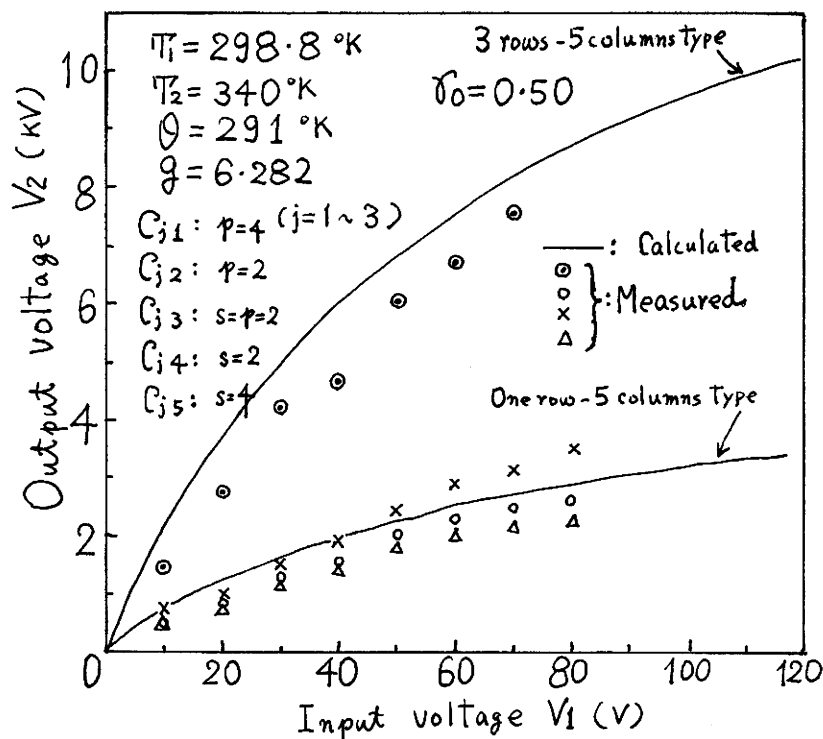


Fig.11 Characteristics of 3 rows-5 columns type.

荷に対し直列に切り換えるとき約3kV以上になると switch を閉じるさいに火花を発生し energy が消失されることである。したがって、これを防止しより大きい出力電圧を得るためには真空 switch などを使う必要がある。

#### 4・5 動作温度の選定と変圧特性の改善

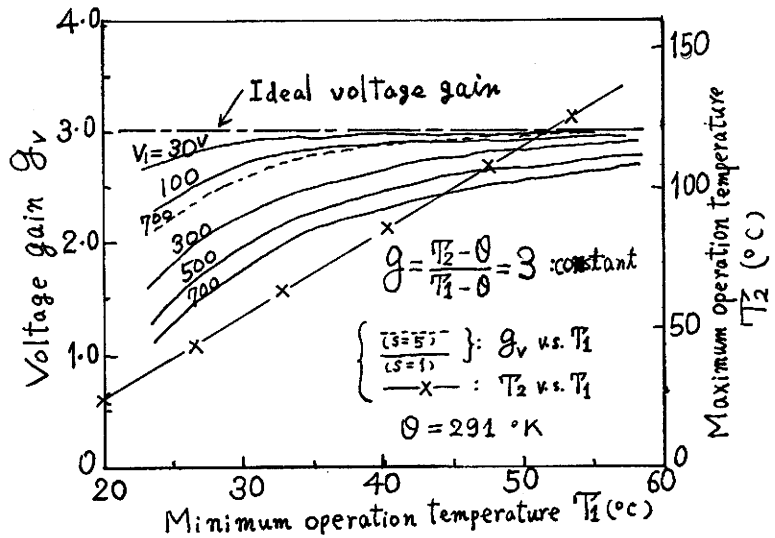
以上では種々の素子構成による実験結果と計算結果の比較を主体にのべてきた。本節では、まず、基本回路について動作温度の選定を検討し、その後、変圧特性を理想状態に近づけるための改善策などをまとめることにしよう。

##### 4・5・1 動作温度の選定

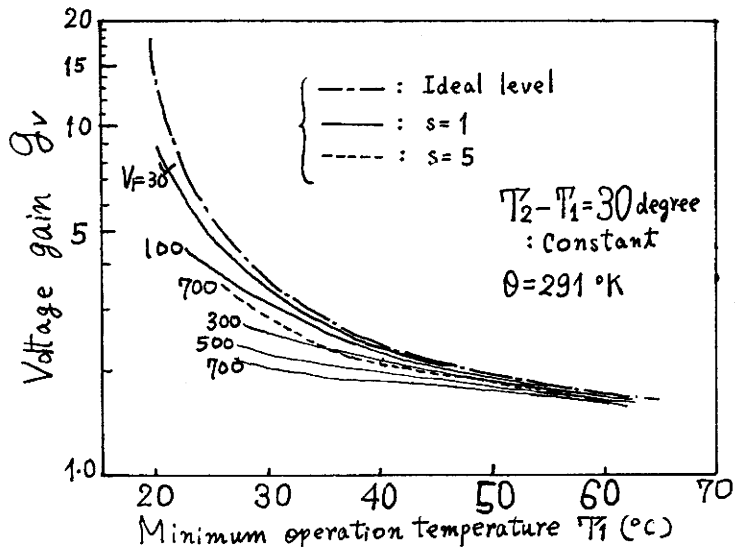
(1)～(6)式からも明らかなように  $C_i(T, V)$  は温度に対しても非直線的な関係にある。しかし、 $T_c$  以上の温度を問題にする限りでは(11)式にみるごとく、 $T_1$  をできるだけ  $T_c$  (すなわち、 $\theta$ ) に近く選び、かつ、 $T_2$  を大きくすれば変圧比は大きくなるが、実際上は変圧比の電圧依存性と関連して考える必要がある。その間の定量的関係の一例を Fig. 12 に示す。(a)図の実線は理想変圧比  $g = 3$  一定となるように  $T_1$  に対して  $T_2$  を決めたとときの基本回路( $s=1$ )の特性を  $V_1$  を parameter として示したものであり点線は  $s=5$ 、 $V_1=700V$  のとき

の特性である。なお、このときの  $T_2$  は×印のごとくである。Fig.12(a)と Fig.6(c)を比較すれば最低動作温度  $T_1$  と直列構成枚数  $s$  の基本回路に与える影響は同じであることがわかる。この結果、変圧比の入力電圧の増大にともなう低下を少なくするためには  $T_1$  と  $s$  を大にすればよいが、 $T_1$  を大とすることは変圧比の値を大きく選定するための要請とは逆である。

(b)図は与える温度差 ( $T_2 - T_1$ ) を 30 deg. 一定にし



(a)



(b)

Fig. 12 Influences of the choice of the minimum operation temperature  $T_1$  on the characteristics of fundamental circuit.

たときの  $g_v - T_1$  特性であるが、この結果は前述のごとく  $T_1$  を  $T_c$  に近く選定すれば変圧比は大きくなることおよび  $T_1$  の選定により  $V_1$  による変圧比の低下が理想 level (同図の一点鎖線) からどれだけ低下するかを明らかにしている。このときの  $s=5$ 、 $V_1=700V$  の特性は同図点線で示されている。

したがって、動作温度  $T_1$  は変圧比の大きさを考慮に入れ、できるだけ高く選べば電圧依存性による低下

も少なくできる。そのさい、後者は上述のごとく直列構成の併用によっていっそう改善される。

#### 4・5・2 変圧特性の改善について

まず、基本回路について考えれば、第3章にのべたように

- (i) 素子の電圧依存性による変圧比の低下
- (ii) 素子の沿面放電および絶縁破壊
- (iii) 素子の温度の均一性

の3点が問題となる。これらに対し、直列構成すれば(4・2・1)にのべたように4つの利点がある。さらに、並直列複合構成を行なえば、並列構成の特徴の一つであるenergyの増大も計れることになる。なお、動作温度は変圧比の入力電圧による低下を考慮して目的に応じた変圧比となるように定める必要がある。

(Fig.12参照)

次に1行 $n$ 列形および $m$ 行 $n$ 列形について考えれば上記3つの問題点のほかに

(iv) 使用素子数を少なくして静電容量配分比 $r_k$ を小さく選定することが加えられる。いま、Fig.13を考

えよう。同図の細実線と点線は全使用素子数40枚、 $r_0 = 0.333$ 、動作温度 $T_1 = 304^\circ K$ 、 $T_2 = 341.4^\circ K$ （すなわち、 $g = 3.877$ ）と直列構成、並列構成ともに等しく選んだときの計算値である。この結果、直列構成によって特性が理想状態に近づくことは明らかであるが、それでも変圧比の低下はかなり大きい。そこで(4・3・2)にのべたように、使用素子数を3倍(120枚)とし、その他の条件を同じにしたときの特性は同図太実線のごとくである。この結果、電圧の増大による変圧比の低下は改善されたが、全使用素子数が大きくなり実際上は(iii)の点から制約が課せられることになる。

したがって、この点に関しては次の2つが有効な手法である。

(a) Fig. 10, 11のごとく1行 $n$ 列形の前半を並列構成、中段を並直列複合構成、後半を直列構成する。

(b) 各段とも並直列複合構成を行なう。

(a)は直列構成だけの場合および(b)と比較して、変圧比の電圧依存性による低下の改善を多少犠牲にしていることになるが、(ii)および(iv)の問題点からかなり良好な構成法となる。

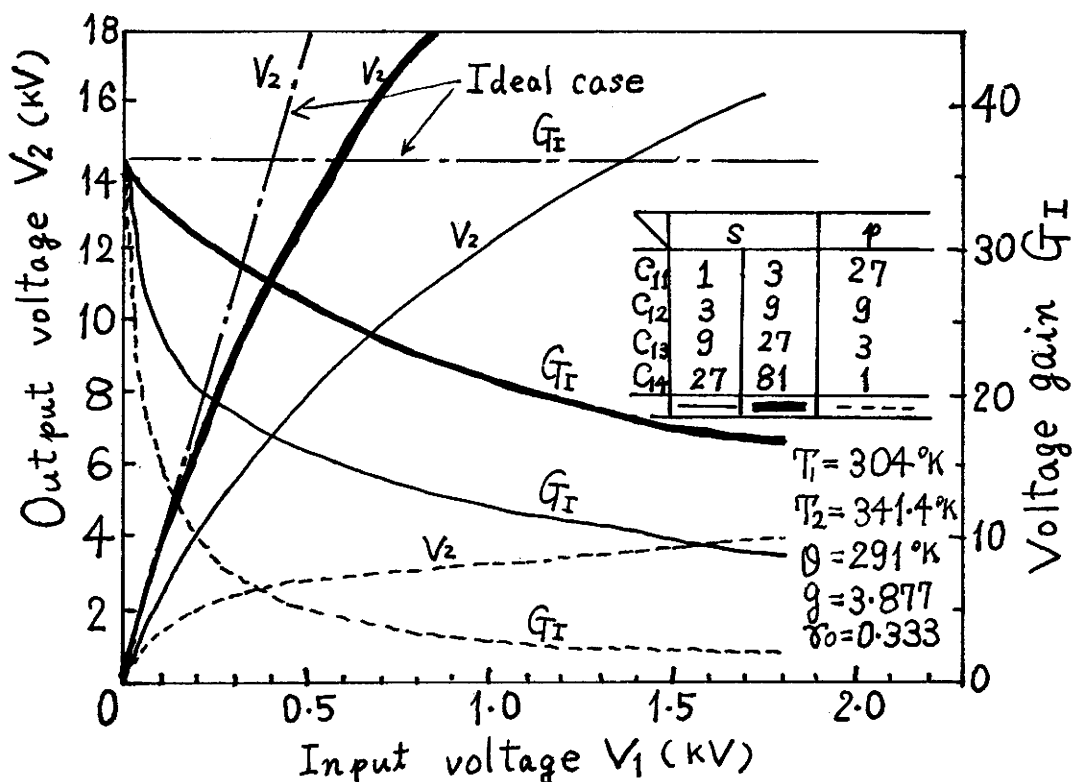


Fig. 13 Comparisons of parallel and series constructions in the one row - 4 columns type. s and p are the numbers of sheets of elements connected in series and parallel in each stage, respectively.

他方、(b)は全使用素子数を少なくして $r_0$ を小さく選ぶことができるので((3・2・3)項参照)、温度の均一性も保ちやすい。電圧依存性および絶縁破壊の改善は直列構成と、各段の静電容量の大きいことから出力電力が増大することは並列構成と同じである。

したがって、並直列複合構成は設計上の自由度の多いことおよび特性の改善への寄与から考え、最も有効な構成法といえる。なお、1行 $n$ 列形および $m$ 行 $n$ 列形の動作温度の選定も基本回路におけると同様に、変圧比の電圧依存性と希望する変圧比の大きさのかねあいから決められなければならない。

## 5 結 言

以上、強誘電体を用いた熱誘電静電変圧器の特性を理想状態の特性に近づけるための検討を素子の構成法および動作温度の選定の点から行なった。その結果、4・5節にのべたごとく、直列構成および並直列複合構成を基本にして各段の素子を構成し、動作温度も変圧比の電圧依存性を考慮に入れて選定すれば

- (i) 素子の電圧依存性による変圧比の低下の改善
  - (ii) 素子の実効的絶縁破壊電圧の向上
  - (iii) 使用素子数を少なくして静電容量配分比を小さく選定することが容易である。
  - (iv) 素子温度の均一性が保たれやすい。
  - (v) 出力電力の増大が計れる。
- などの利点がある。したがって、現在入手可能な強誘

電体が熱誘電素子として必ずしも良好でないが、簡単な操作で、しかも安価にして高電圧を得ることができる。

また、本変圧器の設計は本文にのべた関係式を用いて行なえることは実験結果の示すところである。

最後に、随時御指導、御忠言を賜わっている愛媛大学学長熊谷三郎博士ならびに実験および数値計算に協力いただいた大浦成美、北野和彦、有田睦信の諸君に御礼申し上げる。なお、本研究の一部は昭和42年度文部省科学研究費(各個研究)によったことを付記し、関係各位に謝意を表する。

## 文 献

- 1) 藤本, 松本: 電気学会雑誌, 87, 352 (昭42-2)
- 2) 藤本, 松本: 福井大学工報, 14, 54 (1966-4)
- 3) 熊谷, 藤本, 松本: 電気学会雑誌, 87, 909 (昭42-5)
- 4) 藤本, 松本: 福井大学工報, 15, 151 (1967-4)
- 5) R. A. Brennan & F. D. Mason: IEEE Trans. CP-11 367 (1964)
- 6) 熊谷, 藤本, 松本: 昭和42年電気四学会北陸支部連合大会論文集, 29, (昭42-10)
- 7) 熊谷, 藤本, 松本: 昭和42年電気四学会北陸支部連合大会論文集, 30 (昭42-10)
- 8) 藤本, 松本: 昭和43年電気四学会連合大会論文集, 1340 (昭43-3)

(昭和42年10月18日受理)